

华北石质山区核桃-绿豆复合系统氘同位素变化及其水分利用

孙守家¹, 孟平², 张劲松², 黄辉², 万贤崇^{1,*}

(1. 中国林业科学研究院林业新技术所, 北京 100091; 2. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091)

摘要: 通过对比核桃枝条和绿豆茎内 δD 值差异来分析核桃和绿豆水分来源和利用。结果表明, 核桃-绿豆农林复合系统的根系在表层土壤(0—30 cm)中交叉存在, 生态位重叠。旱季中表层土壤含水量与 δD 值之间存在显著的负相关关系($R^2 = 0.77, P = 0.02$), 雨季相关关系不显著($R^2 = 0.03, P = 0.73$)。 δD 值分析表明, 旱季中核桃利用深层土壤(30—80 cm)水分占总水分来源的 51% 以上, 雨季中则主要利用浅层土壤水分, 间作绿豆和单作绿豆主要利用表层土壤水分。雨季中表层土壤水分能同时满足核桃和绿豆生长需要, 但复合系统中光能竞争导致间作绿豆光合速率显著地低于单作绿豆。旱季风作绿豆 0—20 cm 土壤水分含量、凌晨叶片水势和光合速率明显高于单作绿豆, 显示间作绿豆体内水分状况好于单作绿豆。线性模型分析结果显示间作绿豆体内约有 1.58%—5.39% 的水分来核桃夜晚水力提升, 表明复合系统在旱季一定程度上缓冲季节性水分胁迫对农作物生长的影响。

关键词: 核桃; 绿豆; 农林复合系统; 同位素; 水分来源

Deuterium isotope variation and water use in an agroforestry system in the rocky mountainous area of North China

SUN Shoujia¹, MENG Ping², ZHANG Jinsong², HUANG Hui², WAN Xianchong^{1,*}

1 Institute of New Forest Technology; Chinese Academy of Forestry; Beijing 100091, China

2 Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry; Beijing 100091, China

Abstract: Water is a primary resource limiting terrestrial biological activity, particularly in arid and semi-arid regions. In this study, a temporal and spatial variation of water status in soil and *Juglans regia* and *Vigna radiata* during spring and summer in an agroforestry system in the rocky mountainous area of north China (a semi-arid region) was traced by analyzing the difference of hydrogen isotope. Root dynamics of the two species were measured in both dry and wet seasons. Variation in δD of was compared to detect the water sources and use. Results showed that 61.61% of *J regia* roots co-existed with total roots of *V radiata* in shallow soil (0—30 cm depth). There was a significant difference of shallow soil water content and the δD value between dry and wet season. A significantly inverse correlation ($R^2 = 0.77, P = 0.02$) was found between soil water content and δD value in dry season but not ($R^2 = 0.03, P = 0.73$) in wet season. Analyses of δD value showed that 38.39% of the total roots, distributed in the deep soil layers (30—80 cm depth), absorbed over 51% of the total water from the soil in dry season. The shallow soil provided all water in the monocropped *V radiata*, whereas around 1.58% to 5.39% water in the intercropped *V radiata* was derived from the deep soil. In wet season, around 63.52% to 78.99% water of *J regia* and all water of *V radiata* were extracted from the shallow soil, which reflected that the shallow soil was able to synchronously meet the water need for *J regia* and *V radiata* when the shallow soil had sufficient moisture. However, photosynthetic rate of the intercropped *V radiata* was significant ($P < 0.05$) lower than that of the monocropped due to light

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划课题资助项目(2006BAD03A0501); 中国林科院林业研究所所长基金资助项目(RIF2008-04)

收稿日期: 2010-01-11; **修订日期:** 2010-03-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wxc@caf.ac.cn

competition in the agroforestry system. In dry season, predawn leaf water potential and photosynthetic rate of *V radiata*, as well as the water content in 0–20 cm soil layers, in the intercropping field were significant higher than those in the monocropping field. The δD data also suggested approximately 1.58% to 5.39% water in the intercropped *V radiata* was derived from the hydraulic lift by *J regia* at night. In general, the intercropped *V radiata* presented better water status and hence higher assimilation rate than the monocropped *V radiata* in dry season likely due to water lift by *J regia* and relative higher moisture in understory of *J regia*. However, the intercropped *V radiata* lost a certain photosynthetic capacity in wet season due to being partially shaded by *J regia*. Therefore, the intercropped *V radiata* was able to avoid harsh drought stress in dry season at the expenses of photosynthetic capacity in wet season. On the other hand, the intercropped *V radiata* did not competed with *J regia* for water resources largely due to their differential distribution of root systems. In dry season, *J regia* was able to extract water from the deep soil layers while the *V radiata* mainly depended on water from the shallow soil. In wet season water was not the limitation resource for the plant growth.

Key Words: *Juglans regia*; *Vigna radiata*; agroforestry system; isotope; water source

农林复合系统中同时存在树木和农作物两种以上的不同植物,它们之间相互依存,通过物种间的生态互补功能,充分利用水肥光热资源,从而提高系统的生产力。同时,它们之间亦相互竞争,主要是在地上部分对光的竞争,在地下对养分和水分竞争。研究发现,地下部分的相互作用常常决定农林复合系统内各组分之间的关系^[1],在干旱或无灌溉条件下,种间地下的水分关系问题尤为突出。因此,全面了解系统内植物的水分关系,是发展和完善农林复合经营的前提条件。华北石质山区气候干旱,灌溉条件较差,水资源欠缺与农业生产发展的矛盾突出,是限制农业可持续发展的瓶颈。通过针对性探讨农林复合系统内植物的水分利用状况明确农林复合系统的互利和竞争关系,对华北石质山区发展节水高效的现代农林业和实现农林业可持续发展具有重要意义。

氢氧稳定同位素被认为是水的“指纹”,为研究植物水分利用和分配方式提供了新的观测手段。研究表明,植物根系对土壤水分吸收^[2-3]和水分在木质部运输过程中^[4],一般不发生氢氧稳定同位素的分馏现象,但在少数植物例如盐生^[5]或旱生植物^[6]在吸水过程中氢氧同位素会分馏。因此,大部分植物木质部导管内水分同位素保持与来源水分相同的同位素组成。通过对比植物木质部或茎部水分与各种水源的同位素组成,利用二项或三项分隔线性模型^[7],可以确定植物对不同水分的来源和相对使用量。利用氢氧同位素技术,国内外学者已经对耐旱物种^[8]、热带稀树大草原的树木和草本^[9]、农间混作的玉米和大豆^[10]和不同季节的灌木丛^[11]水分来源进行研究,取得较多成果。

如前所述,农林复合系统既有互利的一面,也可能存在竞争,然而利用同位素技术定量化探讨农林复合系统内种间水分互补和竞争关系的研究鲜有报道。本文在调查单作绿豆和核桃-绿豆复合系统根系分布状况的基础上,采用稳定同位素技术测定单作、复合系统内绿豆茎秆和核桃枝条中氘同位素组成,通过线性模型确定核桃和绿豆在旱季和雨季利用水分的来源及其相对量,结合土壤含水量、叶片水势、光合速率等指标,确定不同季节核桃-绿豆复合系统中水分关系,以期为核桃-绿豆复合系统的生态评价提供基础数据和理论支持。

1 试验区概况

试验地位于河南省济源市境内的黄河小浪底森林生态系统定位研究站(35°01'N, 112°28'E),海拔 310 m。试验区地处太行山南段南麓,黄河流域北缘,属温带大陆性季风气候。全年日照时数为 2 367.7 h,年日照率为 54%,稳定通过 0℃的多年平均积温为 5 282℃。历年平均降水量 641.7 mm,由于受季风气候的影响,年内季节性分布不均匀。6—9 月份平均降水量为 438.0 mm,占全年的 68.3%。

2 材料与方法

2.1 试验材料与设计

试验材料为水平梯田核桃(*Juglans regia*)人工林和农作物绿豆(*Vigna radiata*),梯田南北宽 20 m、东西

长 140 m, 土壤以石灰岩风化母质淋溶性褐色土为主, 土层厚度 50—80 cm, pH 值 6.8—8.5, 石砾含量为 15%—28%, 有机质含量大约为 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效氮含量 2114—8010 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷含量 514—616 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾含量 60—103 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。核桃栽植于 2006 年初, 林带行向为东西向, 株行距分别为 $4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, 平均株高 3.4 m, 南北冠幅 3.4 m, 东西冠幅 3.1 cm, 每木检尺平均地径为 8.9 cm。绿豆行向与核桃树行向一致, 间作绿豆栽培时距离树行 60 cm, 株行距分别为 $25 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ 。单作绿豆位于农林复合系统西侧 20 m 田中, 株行距 $25 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$, 与间作绿豆采取同样管理措施。农林复合系统以 1 棵核桃树与周围间作绿豆作为 1 个实验小区, 核桃树四周预埋 6 根 TDR 管测定水分, 东西两侧 1 m 处 TDR 管测定的是核桃株间土壤水分, 南北两侧 1 m 和 2 m 处 TDR 管测定的是间作绿豆土壤水分, 在核桃行间选取 12 个样点测定间作绿豆光合, 测定点垂直于树行方向上 (图 1), 3 次重复。单作绿豆设定 3 块同样大小实验小区, 每块实验小区提前预埋 4 个 TDR 管以测定土壤水分, 随机选 12 个点测定叶片光合。

2.2 气象因子及土壤水分观测

在核桃地旁设定自动气象站, 连续观测空气温度 (T_a)、降雨量 (R), 所采用的传感器分别为 05103 (RM Young 公司, 美国)、TE525M (Texas 公司, 美国), 数据采集器为 CR10X (Campbell 公司, 美国)。2008 年 4 月在核桃东西两侧距离树干 100 cm 和南北两侧 100 cm 和 200 cm 处分别预埋长 100 cm 的 TDR 测量管, 2009 年使用 TRIME-T3 (IMKO 公司, 德国) 土壤水分测定系统分 20、40、60、80、100 cm 5 层测定土壤水分含量。

2.3 根系分布状况测定

2009 年 9 月对核桃-绿豆复合系统和单作绿豆根系进行调查。复合系统内在距树干南北两侧 50、100、150 cm 和 200 cm 处打土钻取样, 因土壤 80 cm 以下为母质层, 风化程度降低, 根系分布较少, 所以根系取样深度为 80 cm, 每 10 cm 为 1 层, 树北侧编号为 N50, N100 和 N150, 树南侧编号为 S50, S100 和 S150, 南北两侧 200 cm 点编号为 NS200, 严格区分核桃和绿豆根系后装入自封袋中。单作绿豆将实验小区中心假定为树干位置, 按照复合系统取样的位置和方法进行取样。根系清水冲洗后使用 WinRHIZO (Régent 公司, 加拿大) 根系分析系统扫描, WinRHIZO Reg 2005c 软件进行分析。

2.4 叶片水势测定

黎明 06:00 左右, 取核桃树 1 年生枝条上第 4—5 轮叶片打孔, 绿豆在主茎的第 3—4 轮叶片上打孔, 放入 C-52 样品室 25—30 $^{\circ}\text{C}$ 下平衡 20 min, 使用 PSYPRO (Wescor 公司, 美国) 露点水势仪测定。

2.5 叶片光合测定

光合测定是在 08:00 至 09:00 使用 Li-6400 (LI-COR 公司, 美国) 便携式光合测定系统测定, 为了保证光照强度一致, 使用红光 LED 光源设定光照强度为 $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 选择长势一致的 1 年生核桃枝条, 测定距枝条顶端 5—6 轮处的成熟叶片。测定间作绿豆时在核桃树周边的 12 个固定样点上选取具有代表性的绿豆 12 株, 单作绿豆随机选取 12 株, 选取绿豆上第 3—4 轮生长一致、无病虫害的叶片进行测定, 核桃、间作和单作绿豆各进行 3 次重复。

2.6 同位素测定

黎明 06:00 左右, 在复合系统内取核桃树冠中部 1 年生枝条 3—5 cm, 剥去树皮, 装入 8 mL 的 EPA 标准样品瓶中密封。间作绿豆的取样位置在核桃树南北两侧距树干 100—200 cm, 单作绿豆实验区内随机取样, 将绿豆主茎中部 3—5 cm 装入 EPA 样品瓶密封。同时对核桃、间作绿豆和单作绿豆进行土壤取样, 为了方便

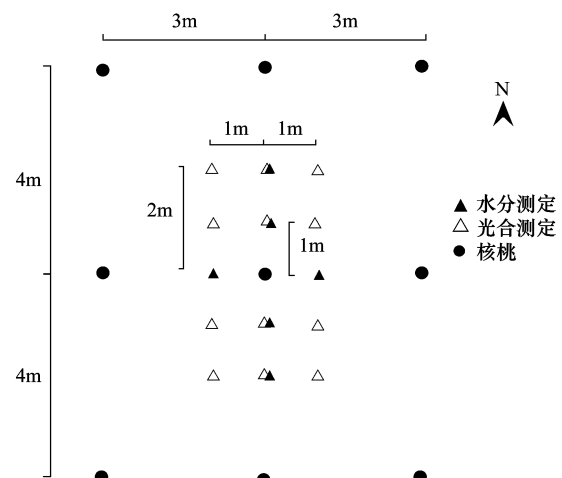


图 1 实验区样点布设示意图

Fig. 1 Sketch of sampling spots in the experimental field

计算参照 Snyder^[12] 的方法将土壤分为两层进行取样, 0—30 cm 为表层土壤, 分别取 5、15、25 cm 土壤各 2 份, 一份装入 EPA 瓶测定同位素, 一份烘干测定含水量。30—80 cm 为深层土壤, 同位素变化较小, 将取出的土壤迅速混匀装入 EPA 瓶。为防止水分蒸发分馏, 使用防水胶带对瓶口进一步密封, 0—5℃ 储藏在便携式冷藏包内, 带回到中国林科院稳定同位素比率质谱实验室, 真空抽提液氮冷凝后使用同位素比率质谱仪 (Finnigan MAT Delta V advantage, ThermoFinnigan 公司, 美国) 测定氘同位素。氘同位素比值是以相对于 V-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) 的千分率 (‰) 给出, 精度分别为 $\pm 2‰$ 。计算方程为:

$$\delta D = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (1)$$

式中, R_{sample} 和 R_{standard} 分别表示样品和国际通用标准物的 D/H 的比值。

当植物具有两种 δD 值不同的水分来源时, 将具有较大 δD 值的水源作为富集端, 具有较小 δD 值的水源作为贫化端, 使用两端线性模型计算每一种来源所占的比例^[7], 公式如下:

$$\delta D = x_1 \delta D_1 + x_2 \delta D_2 \quad (2)$$

$$x_1 + x_2 = 1 \quad (3)$$

式中, x_1 、 x_2 是表层和深层土壤水分对植物所利用水分的贡献率。 δD 为木质部水分氘同位素比值, δD_1 和 δD_2 是表层和深层土壤水分中氘同位素比值, 因表层土壤含水量和 δD 值变化较大, 所以 δD_1 是 5、15、25 cm 土壤 δD 值的加权平均数, 权重为各土壤含水量占总含水量的百分比。

试验在 2009 年 6—10 月进行, 分别在 6 月 17 日、7 月 2 日、8 月 15 日、8 月 27 日和 10 月 6 日对核桃-绿豆复合系统和单作绿豆进行测定。使用 excel 作图, 用 SPSS13.0 分析软件进行数据处理, 对核桃、间作绿豆和单作绿豆进行 One-way ANOVA 分析并用最小显著差数法 (LSD) 进行多重比较, 统计显著性水平为 $P < 0.05$ 。

3 结果与分析

3.1 气象因子

气象观测结果表明试验地 6—9 月份的日均气温较高, 日均气温均在 15℃ 以上, 最高日均气温出现在 7 月份 (图 2)。2009 年试验地气候比较干旱, 从 1 月 1 日到 10 月 6 日试验地共降雨 415.7 mm, 仅有往年降雨的三分之二。其中, 1—7 月份降雨量仅 131.20 mm, 只有往年降雨的四分之一, 从 8 月 16 日开始降雨迅速增加, 到 10 月 6 日降雨 224 mm, 占前 10 个月总降水的 53.89% (图 2)。

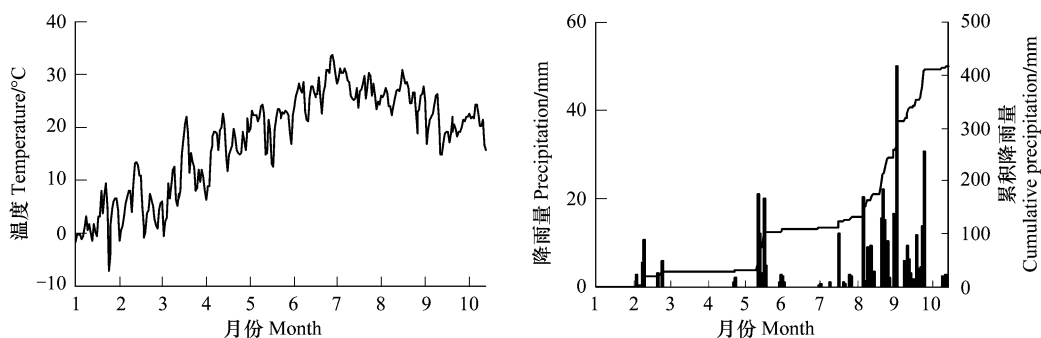


图 2 2009 年 1 月到 10 月试验地温度、降水量和累积降水量变化

Fig. 2 Variation of temperature, precipitation and cumulative precipitation from January to October in 2009

3.2 核桃和绿豆的根系分布

核桃-绿豆复合系统中根系分布较复杂。表 1 显示, 垂直方向上核桃根系不均匀地分布在 0—80 cm 的土壤中, 其中 10—20 cm 土壤中根长密度最大, 占总根系总密度的 25.70%, 最大根长密度在核桃南侧 100 cm 处 ($809.82 \text{ cm}/\text{dm}^3$), 20—80 cm 土壤中根长密度随深度增加逐渐减少, 0—30 cm 土壤中根长密度占总根长密度的 61.61%, 表明核桃根系主要分布在表层土壤。在水平方向上, 核桃南侧 100 cm 处 (S100) 的平均根长密度最大 ($337.79 \text{ cm}/\text{dm}^3$), 林带中间位置 (NS200) 的平均根长密度最小 ($207.14 \text{ cm}/\text{dm}^3$)。结果显示核桃根系

集中分布区域在 S100—S150 和 N100—N150 处,且南侧平均根长密度大于北侧。无论单作还是间作,绿豆根系仅分布在 0—30 cm 土壤中,其中 0—10 cm 土壤中根长密度分别占总根长密度 61.53% 和 60.28%,10—30 cm 土壤根长密度分别占 38.47% 和 36.92%。核桃-绿豆复合系统中根系在 0—30 cm 的土壤中交叉分布,物种间根系存在生态位重叠。

表 1 核桃、间作绿豆和单作绿豆的根系分布

Table 1 Root distribution of *J regia*, *V radiate* intercropping and *V radiate* monocropping /(cm/dm³)

深度/cm Depth		树北侧 50 cm N50	北侧 100cm N100	树北侧 150cm N150	树南北 200cm NS200	树南侧 150cm S150	树南侧 100cm S100	树南侧 50cm S50
核桃 J	0—10	346.17 ± 35.24	590.96 ± 64.92	580.85 ± 161.99	301.22 ± 77.39	571.09 ± 205.26	662.58 ± 76.77	468.74 ± 34.92
	10—20	478.04 ± 24.85	722.28 ± 79.35	709.92 ± 164.65	353.01 ± 64.91	698.00 ± 173.09	809.82 ± 93.83	647.30 ± 48.23
	20—30	257.34 ± 58.39	402.05 ± 31.75	274.00 ± 33.66	425.73 ± 59.35	338.71 ± 23.65	215.04 ± 17.68	418.03 ± 70.71
	30—40	210.55 ± 47.77	328.95 ± 25.98	224.18 ± 27.54	372.86 ± 40.83	259.20 ± 44.71	175.94 ± 14.47	342.03 ± 57.85
	40—50	256.53 ± 68.50	195.24 ± 20.79	106.34 ± 11.73	181.68 ± 20.06	278.92 ± 21.07	238.71 ± 43.25	174.67 ± 37.03
	50—60	209.89 ± 56.04	159.74 ± 17.01	176.57 ± 16.79	158.92 ± 30.94	156.56 ± 31.48	195.31 ± 32.81	142.91 ± 30.30
	60—70	206.26 ± 40.22	150.92 ± 89.00	81.29 ± 24.58	136.08 ± 22.63	202.01 ± 28.57	120.66 ± 18.55	96.87 ± 18.82
	70—80	168.76 ± 20.05	123.55 ± 23.21	66.51 ± 20.11	118.16 ± 10.73	64.61 ± 9.14	84.24 ± 25.66	79.26 ± 28.12
间作绿豆 VI	0—10		132.59 ± 19.64	135.73 ± 47.48	147.92 ± 13.30	162.72 ± 12.46	151.90 ± 22.59	
	10—20		19.64 ± 13.09	90.48 ± 31.66	98.62 ± 8.87	108.48 ± 8.31	101.26 ± 15.06	
	20—30				9.98 ± 0.60	10.39 ± 2.88	3.71 ± 0.51	
单作绿豆 VM	0—10		163.25 ± 38.65	172.35 ± 33.13	163.87 ± 18.54	156.33 ± 26.49	196.36 ± 46.75	
	10—20		91.24 ± 18.69	102.31 ± 24.33	95.78 ± 24.36	99.85 ± 34.27	100.37 ± 14.84	
	20—30		1.22 ± 0.36	12.35 ± 3.61	10.23 ± 1.15	9.55 ± 1.04	9.86 ± 2.40	

J: 核桃 *J regia*; VI: 间作绿豆 *V radiate* intercropping; VM: 单作绿豆 *V radiate* monocropping; N: 树北侧 northern side of tree; S: 树南侧 southern side of tree; NS: 树南北 northern and southern sides of tree

3.3 土壤含水量变化

核桃-绿豆复合系统和单作绿豆的土壤水分存在时空变化。图 3 结果显示,在时间上 6 月 17 日至 8 月 15 日的核桃、间作绿豆和单作绿豆的土壤含水量均低于 8 月 27 日和 10 月 6 日,主要是因为 8 月 16 日前降水较少,8 月 16 日至 10 月 6 日降水较多,占 2009 年前 10 个月的 53.89%。在空间上,0—20 cm 土壤易受到水分蒸发影响,含水量低于其他土层。40 cm 以下的土壤水分含量变化相对较小。核桃、间作绿豆单作绿豆的土壤水分存在差异,0—20 cm 土壤水分含量是核桃株间 > 间作绿豆 > 单作绿豆,从 20—60 cm 土壤水分含量是单作绿豆 > 间作绿豆 > 核桃株间。8 月 15 日 60—100 cm 单作绿豆土壤水分含量最小,其他时间均为单作绿豆土壤含水量大于核桃—绿豆复合系统(图 3)。

3.3 光合速率与叶片水势变化

图 4 显示单作绿豆和核桃-绿豆复合系统的光合能力存在差异。6 月 17 日绿豆刚刚开始生长不久,单作绿豆和间作绿豆光合速率之间差异不显著。7 月 2 日和 8 月 15 日间作绿豆的光合速率高于间作绿豆,二者差异显著。降雨后的 8 月 27 日和 10 月 6 日间作绿豆的光合速率明显低于单作绿豆,差异显著。黎明前叶片水势是反映植物体内水分状况最灵敏指标之一,图 4 显示 6 月 17 日单作绿豆与间作绿豆黎明叶片水势没有显著差异,7 月 2 日和 8 月 15 日间作绿豆的叶片水势明显高于单作绿豆,二者差异显著,降水后的 8 月 27 日和 10 月 6 日间作绿豆和单作绿豆的叶片水势比 7 月 2 日和 8 月 15 日明显升高,但 8 月 27 日和 10 月 6 日间作绿豆和单作绿豆的叶片水势差异不显著。

3.4 氮同位素变化

核桃枝条和绿豆茎内的氮同位素信息来源于它们所利用的不同环境水分。图 5 显示 0—30 cm 的表层土壤受到环境影响较大,6 月 17 日、7 月 2 日和 8 月 15 日的表层土壤 δD 值逐渐增加,δD 值由 -38.79 升高到

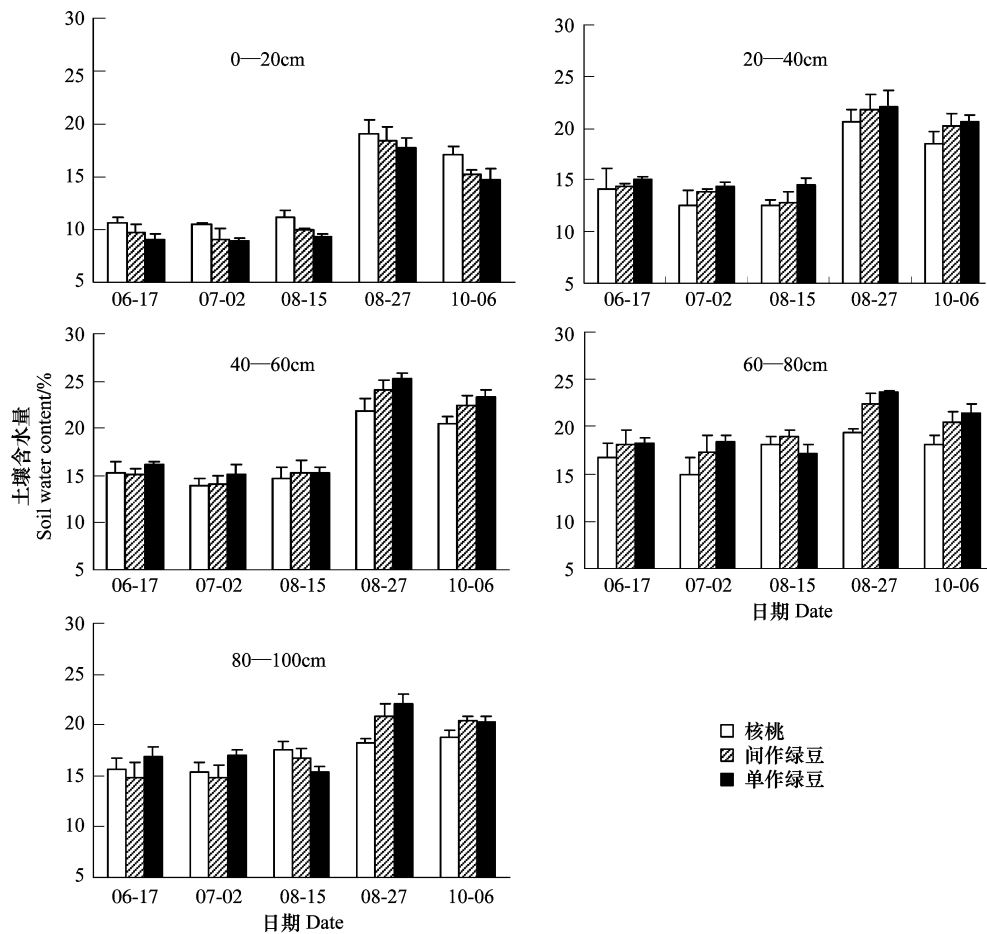


图3 不同深度土壤的含水量变化

Fig.3 Variation of water content in different depth soil

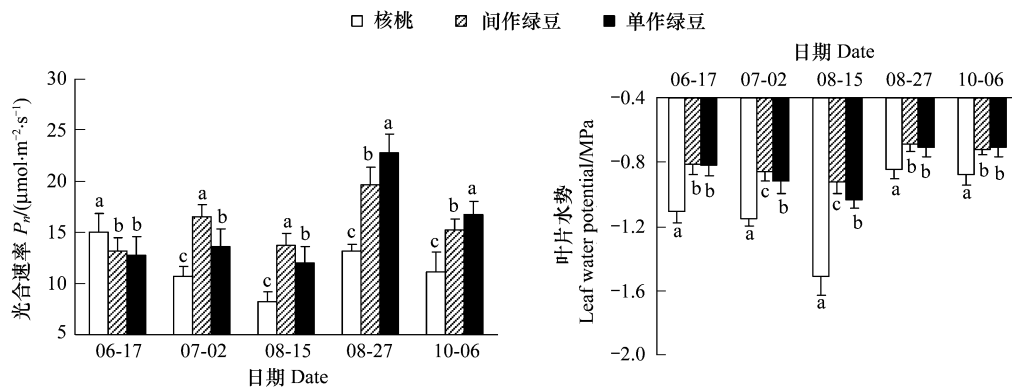


图4 光合速率和凌晨叶片水势变化

Fig.4 Variation of photosynthetic rate and predawn leaf water potential

图中 a、b、c 不同字母标注项间代表 0.05 水平上差异显著

-28.78, 3 次测定之间的 δD 值差异显著。雨季来临后降水增多, 3 场较大降水的 δD 值分别为 -67.35、-69.38 和 -65.68, 8 月 27 日和 10 月 6 日的表层土壤中 δD 值迅速下降到 -61.35 和 -58.09, 二者之间差异不显著, 但与 6 月 17 日、7 月 2 日和 8 月 15 日相比差异显著。深层土壤中的 δD 值保持相对稳定, 在 -65.68 至 -69.03 之间变化, 各测定时间之间的 δD 值没有显著差异。图 5 显示, 6 月 17 日、7 月 2 日和 8 月 15 日的

核桃和绿豆体内 δD 值明显高于 8 月 27 日和 10 月 6 日,表明旱季和雨季的核桃和绿豆利用水分来源可能存在差别。6 月 17 日间作绿豆和单作绿豆 δD 值差异不显著,但 7 月 2 日和 8 月 15 日间作绿豆 δD 值明显低于单作绿豆,二者差异显著,8 月 27 日和 10 月 6 日间作绿豆 δD 值与单作绿豆没有显著差别。6 月 17 日—8 月 15 日核桃 δD 值远远低于绿豆,差异显著,表明核桃和绿豆在旱季水分来源上存在差异,降雨后的 8 月 27 日和 10 月 6 日二者之间差异不显著。

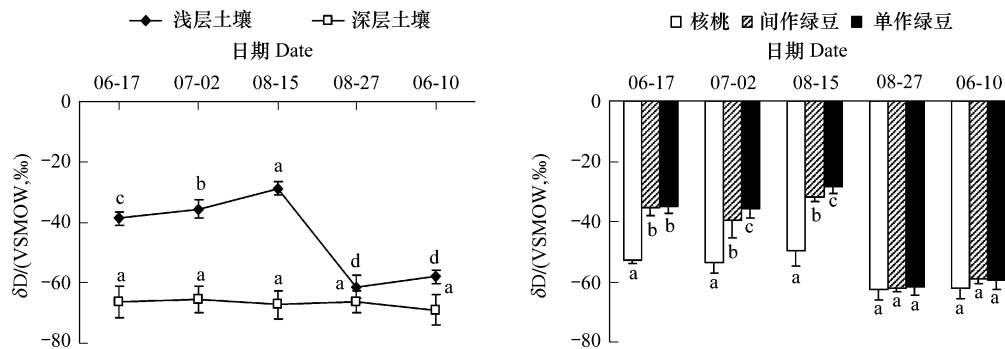


图 5 不同深度土壤、核桃、绿豆氮同位素变化

Fig.5 Variation of δD value in different depth soil, *J regia* and *V radiate*

图中 a、b、c 不同字母标注项间代表 0.05 水平上差异显著

3.5 核桃和绿豆的水分来源

核桃和绿豆体内氮同位素来源于土壤中的水分,对比核桃枝条、绿豆茎内的水分与表层和深层土壤水分的同位素组成差异,利用二项分隔线性模型可计算出它们对表层和深层土壤水分的相对使用量。核桃在 6 月 17 日、7 月 2 日和 8 月 15 日主要利用深层土壤水分,比例分别为 51.38%、53.70% 和 54.77%,降水后表层土壤水分增加,8 月 27 日和 10 月 6 日核桃利用表层土壤水分比例分别为 78.99% 和 63.52%,而绿豆主要利用表层土壤水分。不过,间作绿豆与单作绿豆之间存在一定差别,6 月 17 日至 8 月 15 日单作绿豆体内水分则完全来自于表层土壤,间作绿豆体内水分却有一部分来源于深层土壤,7 月 2 日和 8 月 15 日利用比例分别为 1.58% 和 5.39%。尽管间作绿豆根系没有生长到深层土壤中,但体内有一部分水分来源于深层土壤,这部分水分是核桃“水分提升”作用将深层土壤水分提升并释放到浅层土壤。降雨后的 8 月 27 日和 10 月 6 日间作绿豆来源于深层土壤水分比例分别为 19.11% 和 17.82%,单作绿豆来源于深层土壤水分比例分别为 8.25% 和 11.24% (图 6)。

4 讨论

4.1 土壤水分变化与氮同位素关联

土壤水分含量在旱季和雨季变化较大,尤其是表层土壤水分差别更大。试验结果显示,0—20 cm 土壤含水量旱季和雨季分别在 8.9%—11.2% 和 14.8%—19.1% 范围内变化,20—40 cm 土壤含水量分别在 12.4%—15.1% 和 18.5%—22.3% 范围内变化,40 cm 以下的土壤水分含量变化相对稳定。表层土壤水由于蒸发易产生氢氧同位素的分馏^[13],比下层土壤水更加富集重同位素组成,不同层次土壤水分氢氧同位素组成存在着显著的差异^[14]。旱季表层土壤内 δD 值在 -38.79—-28.78 范围变化,雨季来临后 3 场较大降水的 δD 值分别为 -67.35、-69.38 和 -65.68,受降水影响表层土壤中 δD 值迅速下降,深层土壤中 δD 值保持相对稳定。统计分析表明,旱季中表层土壤水分与 δD 值之间存在显著的负相关关系 ($R^2 = 0.77$, $P = 0.02$),雨季中表层土壤 δD 值较低,与土壤含水量相关性不显著 ($R^2 = 0.03$, $P = 0.73$) (图 7)。Drake 和 Franks^[15] 研究热带雨林水分利用策略时也发现土壤水势与 $\delta^{18}O$ 在旱季呈现显著相关关系但雨季这种关系不显著。表层土壤 δD 值与土壤含水量密切相关,为研究植物根系水分利用与表层土壤含水量之间的关系提供了新途径。

4.2 核桃和绿豆根系分布及水分利用的来源

根系是植物吸收水分和养分的重要器官,是联系土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 系统水分运动的重要环

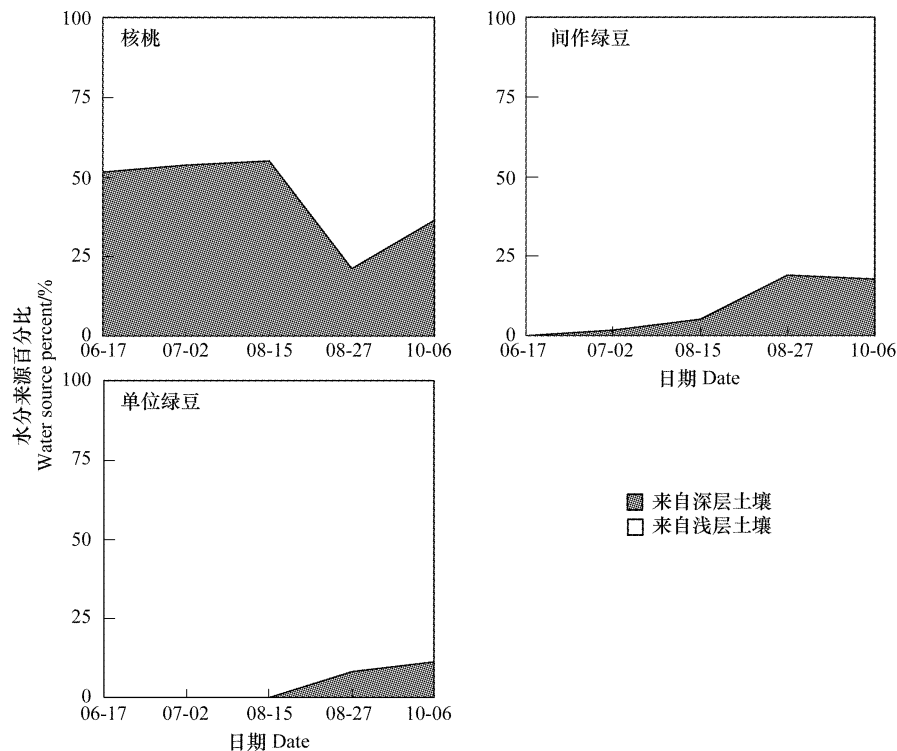


图6 核桃、间作绿豆和单作绿豆水分利用来源的比例

Fig. 6 Percentage of water source in *J regia*, *V radiata* intercropping and *V radiata* monocropping according to deuterium isotope of shallow and deep soil

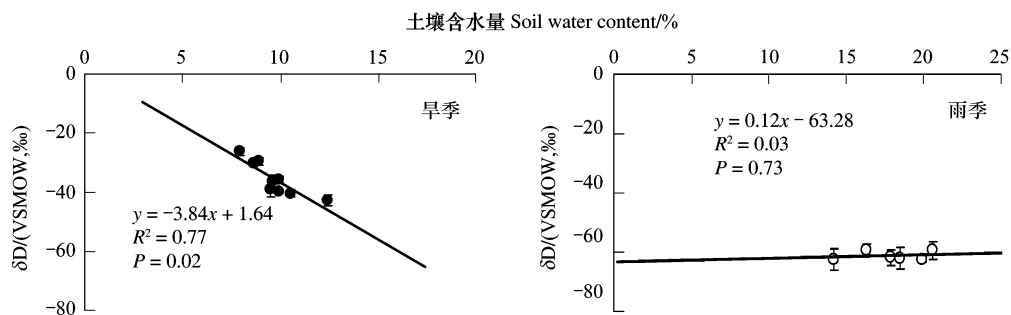


图7 旱季和雨季浅层土壤 δD 值与土壤含水量之间的关系

Fig. 7 Relationship between δD value and soil water content of shallow soil in dry and wet season

节,其分布会影响根系对水分的吸收能力和效率^[16]。在核桃-绿豆复合系统的行间,核桃根系在水平方向上主要分布在林带南北两侧 100—150 cm 范围内,在垂直方向上主要集中在 0—30 cm 的范围内,占整个根长密度的 61.15%,且细根较多,平均直径只有 0.88 mm,吸收能力较强。绿豆根系较浅,分布在 0—30 cm 土壤中。因此,在核桃和间作绿豆的根系在 0—30 cm 土壤中交叉分布,尤其是在核桃树南北两侧 100—150 cm 处。

大量的核桃根系与绿豆根系重叠,是否会强烈竞争表层土壤水分而影响各自的生长? 这个问题一直困扰着研究者。同位素技术发展为区分植物水分利用来源提供了一个非常有效的方法。根对水分的吸收尽管改变了土壤水分含量,但不会改变土壤水分同位素组成。Brande 等^[17] 研究发现生长季节的树体木质部中的 $\delta^{18}O$ 和 δD 值通常与 2—20 cm 土壤水分的同位素组成相似,认为同位素信号能有效地分辨木质部水分来源的动态变化。图 6 结果显示,核桃在旱季时主要利用深层根系水分,根长密度占 38.39% 深层根系利用深层水分比例在 51.38% 以上,而 61.61% 的表层根系利用表层土壤水分仅占 48.62%,降水后才开始大量利用表层

土壤水分,达到 78.99%,可能的原因是核桃表层根系在旱季活性并不高,深层根系为核桃生长提供了主要的水分来源。降水以后,表层根系活性增加,才开始大量吸收表层土壤水分,而单作和间作绿豆所利用水分主要来源于表层土壤。February 等^[9]利用同位素追踪技术对热带稀树大草原不同深度水分利用进行研究,发现树木主要是利用深层土壤水分而草本则是利用表层土壤水分。Sekiya 和 Yan^[10]测定了农田混作的玉米和大豆对土壤水分利用,发现大豆多利用深层的水分,而玉米较多的利用表层水分。这些研究均表明水分来源地差异为不同物种间共存提供基础。

4.3 核桃-绿豆复合系统种间水分关系

核桃与绿豆根系在 0—30 cm 土壤中交叉分布,根据生态位理论,根系重叠是物种间竞争水资源的一个必要条件,但重叠并不一定必然导致竞争。图 3 显示,雨季中表层土壤含水量约 14.8%—19.1%,水分比较充足。同位素测定结果显示,尽管雨季中核桃 63.52%—78.99% 和间作绿豆 94.61%—78.99% 的水分来自竞争区域,但间作绿豆和单作绿豆之间的叶片水势差异不显著,表明间作绿豆与核桃之间在水分充足的情况下可能不存在水分竞争。值得注意的是雨季中单作绿豆雨季的光合速率显著地高于间作绿豆(图 4),主要是因为核桃的冠幅直接影响到间作绿豆的有效光辐射,从而降低了间作绿豆的光合速率。在水分不是限制因子情况下,复合系统中光能竞争可能会导致间作绿豆产量下降^[18]。

不过,旱季中复合系统的根系重叠可能会导致物种间存在一定的水分竞争,但农林复合系统物种间水分的再分配相对缓解了农作物的水分胁迫程度^[19]。试验结果表明,旱季中单作绿豆 0—20 cm 土壤水分含量明显低于间作绿豆和核桃株间。造成这种现象原因可能有两个,一是核桃树有减光照,降温和减风速作用,间作绿豆和核桃株间的土壤水分蒸散减弱,同时复合系统也降低农作物蒸腾耗水效应^[20];二是核桃“水分提升”引起的土壤剖面中水分的再分配。水分利用来源分析(图 6)表明旱季间作绿豆体内水分约有 1.58%—5.39% 来自于深层土壤而单作绿豆没有,且绿豆根系分布在 0—30 cm 土壤中并不能直接吸收 30 cm 以下的土壤水分,所以间作绿豆体内深层土壤水分是核桃根系在夜晚将深层土壤水分提升并释放到表层土壤的结果。Penuelas 和 Filella^[21]对西班牙东北地中海森林研究发现在干燥夏季树木将深层土壤水分提升并释放到表层土壤的现象。凌晨叶片水势是反映植物体内水分状况灵敏指标,旱季中间作绿豆叶片水势高于单作绿豆,二者差异显著,表明间作绿豆水分状况好于单作绿豆,这可能是核桃提升的水分被间作绿豆吸收的结果。Ludwig 等^[22]在非洲东部稀树草原中研究发现 *Acacia tortilis* 会通过根系产生水分提升使地下水上升,同时也发现树木附近土壤比远处土壤的水势低,表明在树木附近树对草本的促进作用与竞争同时存在。Fernández 等^[23]发现复合系统中的松树很少利用表层土壤水分,松树和草在土壤水分利用上相互补充。可能正是由于这种相互补充作用,旱季中间作绿豆体内水分状况明显好于单作绿豆,其光合速率显著地高于单作绿豆,也印证了这一点。

4.4 存在问题及其展望

利用线性模型来定量区分不同水源的方法还存在许多需要改进的地方。现实中植物水分利用来源比较复杂,当水分利用来源超过 3 个时,利用这种方法也很难定量区分水分来源及其比例。此外,如果水分利用来源的氢氧同位素分布相对均质,利用稳定同位素组成的差异对植物水分利用来源进行分析就很难确定其来源^[7]。利用同位素技术判断水分来源时,氢氧稳定同位素的组成必须具有广泛的时空分布异质性^[24],最好相对差异在 10% 以上^[25]。本文利用线性模型计算结果显示,间作绿豆和单作绿豆在雨季中均利用了深层土壤水分,但绿豆根系并没有到达深层土壤不可能吸收深层水分,计算结果似乎与事实相互矛盾。原因可能是因为雨季中表层土壤 δD 值为 -61.35,深层土壤 δD 值为 -66.33,空间分布的异质性较小,造成计算结果出现误差。另外,核桃 61.61% 表层根系旱季只吸收 45%—48% 水分而雨季高达 78.99%,是否表明其根系具有二态性;是否又在雨季改变功能根的深度有待试验进一步验证。

References:

- [1] Yun L, Bi H X, Ren Y, Wu J, Chen P P, Ma W J. Research oil soil moisture relations among types of agroforestry system in the Loess Region.

- Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(6):110-114.
- [2] Confiantini R, Gratzia S, Tongiorgi E. Oxygen isotopic composition of water in leaves//Isotopes and Radiation in Soil-Plant Nutrition Studies. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1965: 405-410.
- [3] Wershaw R L, Friedman I, Heller S J. Hydrogen isotope fractionation of water passing through trees//Hobson F, Speers M eds. Advances in Organic Geochemistry. New York: Pergmon, 1966: 55-67.
- [4] Shi H, Liu S R, Zhao X G. Application of stable hydrogen and oxygen isotope in water circulation. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(2): 163-166.
- [5] Lin G H, Sternberg L da S L. Hydrogen isotopic fractionation during water uptake in coastal wetland plants//Ehleringer J, Hall A, Farquhar G eds. Stable Isotopes and Plant Carbon-Water Relations. San Diego: Academic Press, 1993: 497-510.
- [6] Ellsworth P Z, Williams D G. Hydrogen isotope fractionation during water uptake by woody xerophytes. Plant and Soil, 2007, 291: 93-107.
- [7] White J W, Cooker E R, Lawerence J R. The D/H ratios of sap in trees: implications of water sources and tree ring D/H ratios. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1985, 49: 237-246.
- [8] Zencichs S J, Froend R H, Turner J V, Gailitis V. Influence of groundwater depth on the seasonal sources of water accessed by Banksia tree species on a shallow, sandy coastal aquifer. Oecologia, 2002, 131: 8-19.
- [9] February E, Higgins S, Bond W J. Using stable water isotopes to determine the depth of water used by different sizes of savanna trees. South African Journal of Botany, 2007, 73(2):287-292.
- [10] Sekiya N, Yano K. Do pigeon pea and sesbania supply groundwater to intercropped maize through hydraulic lift? -Hydrogen stable isotope investigation of xylem waters. Field Crops Research, 2004, 86: 167-173.
- [11] McCole A A, Stern L A. Seasonal water use patterns of *Juniperus ashei* on the Edwards Plateau, Texas, based on stable isotopes in water. Journal of Hydrology, 2007, 342: 238-248.
- [12] Snyder K A, Williams D G. Water source used by riparian trees varies among stream types on the San Pedro River, Arizona. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 105:227-240.
- [13] Durand J L, Bariac T, Chesquière M, Biron P, Richard P, Humphreys M, Zwierzykowski Z. Ranking of the depth of water extraction by individual grass plants, using natural ^{18}O isotope abundance. Environmental and Experimental Botany, 2007, 60:137-144.
- [14] Allison G B, Leaney F W. Estimation of isotopic exchange parameters, using constant-feed pans. Journal of Hydrology, 1982, 55: 151-161.
- [15] Drake P L, Franks P J. Water resource partitioning, stem xylem hydraulic properties, and plant water use strategies in a seasonally dry riparian tropical rainforest. Oecologia, 2003, 137: 321-329.
- [16] Zhang J S, Meng P, Yin C J. Spatial distribution characteristics of apple tree roots in the apple-wheat intercropping. Acta Ecologica Sinica, 2002, 38(4): 30-33.
- [17] Brandes E, Wenninger J, Koeniger P, Schindler D, Rennenberg H, Leibundgut C, Mayer H, Gessler A. Assessing environmental and physiological controls over water relations in a Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stand through analyses of stable isotope composition of water and organic matter. Plant, Cell and Environment, 2007, 30:113-127.
- [18] Peng X B, Cai J, Jiang, Z M, Zhang Y Y, Zhang S X. Light competition and productivity of agroforestry system in loess area of Weibei in Shanxi. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(11): 2414-2419.
- [19] Zhao Y, Zhang B, Wang M Z. Assessment of competition for water, fertilizer and light between components in the alley cropping system. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(6): 1792-1801.
- [20] Zhang J S, Meng P. Simulation on water ecological characteristics of agroforestry in the hilly area of Taihang Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(6): 1172-1177.
- [21] Penuelas J, Filella I. Deuterium labelling of roots provides evidence of deep water access and hydraulic lift by *Pinus nigra* in a Mediterranean forest of N E Spain. Environmental and Experimental Botany, 2003, 49(3): 201-208.
- [22] Ludwig F, Dawson T E, Kroon H, Berendse F, Prins H H T. Hydraulic lift in *Acacia tortilis* trees on an East African savanna. Oecologia, 2003, 134(3): 293-300.
- [23] Fernández M E, Gyenge J, Licata J, Schlichter T, Bond B J. Belowground interactions for water between trees and grasses in a temperate semiarid agroforestry system. Agroforestry Systems, 2008, 74: 185-197.
- [24] Duan D Y, Ou Y H. Application of stable hydrogen and oxygen isotope in analyzing plant water use sources. Ecology and Environment, 2007, 16(2): 655-660.
- [25] Burgess S S O, Pate J S, Adams M A, Dawson T E. Seasonal water acquisition and redistribution in the Australian woody phreatophyte *Banksia prionotes*. Annals of Botany, 2000, 85: 215-224.

参考文献:

- [1] 云雷, 毕华兴, 任怡, 吴坚, 陈攀攀, 马雯静. 黄土区果农复合系统间水分关系研究. 水土保持通报, 2008, 28(6):110-114
- [4] 石辉, 刘世荣, 赵晓广. 稳定性氢氧同位素在水分循环中的应用. 水土保持学报, 2003, 17(2): 163-166.
- [16] 张劲松, 孟平, 尹昌君. 果农复合系统中果树根系空间分布特征. 林业科学, 2002, 38(4): 30-33.
- [18] 彭晓邦, 蔡靖, 姜在民, 张远迎, 张硕新. 渭北黄土区农林复合系统光能竞争与生产力. 应用生态学报, 2008, 19(11): 2414-2419.
- [19] 赵英, 张斌, 王明珠. 农林复合系统中物种间水肥光竞争机理分析与评价. 生态学报, 2006, 26(6): 1792-1801.
- [20] 张劲松, 孟平. 农林复合系统水分生态特征的模拟研究. 生态学报, 2004, 24(6): 1172-1177.
- [24] 段德玉, 欧阳华. 稳定氢氧同位素在定量区分植物水分利用来源中的应用. 生态环境, 2007, 16(2): 655-660.